芸苔属饲用作物对反刍动物甲烷减排的作用及机理

孙学钊

(吉林农业科技学院动物科技学院，反刍动物精准营养与智慧养殖创新中心，吉林 132109)

摘　要：甲烷是反刍动物消化道微生物降解饲料的过程中产生的一种温室气体。反刍动物甲烷排放不仅造成了饲料的能量损失，也加重了地球的温室效应。芸苔属（*Brassica* spp.）饲用作物主要用于填闲种植，具有较高的营养价值。在不同季节、舍饲或放牧、混合或单独饲喂情况下，芸苔属饲用作物能大幅减少反刍动物甲烷排放，具有良好的推广应用前景。针对其降低排放的原因，前人在饲料化学成分、瘤胃发酵代谢参数、瘤胃微生物等方面作了一些探索，但其机理仍不清楚。本文综述了芸苔属饲用作物减少反刍动物甲烷排放的研究进展，并探讨了可能的减排机理。

关键词：芸苔属饲用作物；甲烷排放；减排；反刍动物；作用；机理

中图分类号：S816　　　　　文献标识码：　　　　　文章编号：

全球气候变暖正受到全人类的广泛关注。人类活动（包括工农业生产）排放的温室气体是造成全球气候变暖的主要驱动力。甲烷是造成地球温室效应的重要气体，其产生的温室效应是二氧化碳的 21 倍[1]。全球每年排入大气的甲烷为 5~6 亿 t，甲烷在大气中的半衰期为 8.4 年[2]。全球人类活动产生的甲烷排放中农业占 62%，其中反刍动物排放的甲烷占农业排放的 58%[3]。就中国而言，农业温室气体排放占全国总排放量的 11%，其中家畜肠道发酵和粪肥产生的温室气体占农业的 54%[4]，从 1949 年至 2003 年，畜禽甲烷排放量年增长 2.4%[5]。可见，畜牧业是甲烷排放的重要来源。单胃畜禽甲烷排放很少，反刍动物是排放的主体[6]。反刍动物的甲烷排放不但加重了地球的温室效应，而且还造成家畜能量损失，损失量占食入代谢能的 3.9%~10.7%[7]。因而，减少反刍动物甲烷排放成为畜牧科学界的研究热点。目前科学界正努力探索反刍动物甲烷减排机理，寻求简便、有效、低成本、无副作用的减排措施。芸苔属（*Brassica* spp.）饲用作物是重要的填闲牧草。研究发现，这类牧草能

收稿日期：2018–04–11

基金项目：吉林农业科技学院特聘教授启动基金项目吉农院合字［2018］第 5001 号

作者简介：孙学钊（1964—），男，江苏海安人，教授，博士，从事反刍动物营养学、饲料资源开发利用、甲烷排放研究。E-mail: xuezhaos@hotmail.com

大幅减少反刍动物的甲烷排放[8]。本文将对芸苔属饲用作物减少反刍动物甲烷排放的研究进展进行综述，并探讨可能的减排机理。

1 反刍动物甲烷排放及减排措施

反刍动物排放的甲烷主要在瘤胃内形成[9]。饲料在瘤胃内被微生物降解发酵，生成短链脂肪酸、氨、二氧化碳、甲烷和氢等产物。氢和二氧化碳为甲烷菌利用，生成甲烷。

瘤胃内饲料发酵类型影响甲烷的生成，发酵产生的丙酸比乙酸和丁酸生成的甲烷少[10]。甲烷菌适宜生长的 pH 为 6.0~7.5，下限是 5.5~6.5。瘤胃 pH 低时，丙酸生成量也较多。瘤胃生理参数也会影响甲烷生成。瘤胃外流速度提高，减少了饲料的降解发酵，提高了溶解态氢的浓度，有利于丙酸的形成，从而减少甲烷生成[10]。

减少反刍动物甲烷排放可通过减少甲烷生成量和降低甲烷排放强度来实现。减少甲烷生成量既可通过增加电子受体，替代二氧化碳与瘤胃发酵生成的氢结合，从而不形成甲烷，也可直接抑制甲烷菌。电子受体主要是硝酸盐、硫酸盐。直接抑制甲烷菌活性，主要利用离子载体类抗生素、脂类以及植物提取物和化学抑制剂[11]，还有通过驱原虫等方法。降低甲烷排放强度指减少生产单位畜产品的甲烷排放量。常用的措施包括改变饲粮组成、提高饲粮消化率、改善饲养管理、增进家畜健康和福利、提高繁殖率、培育高产或低甲烷排放的家畜新品种[12-13]。这些措施易于推广应用，也易为公众接受。其中利用替代牧草简单易行，又不增加成本。与作为标准牧草的多年生黑麦草（*Lolium perenne*）相比，芸苔属饲用作物可大幅降低（–30%）甲烷排放[14]，显示了良好的应用前景。

2 芸苔属饲用作物对反刍动物甲烷减排的作用

2.1 芸苔属饲用作物

芸苔属饲用作物属于十字花科植物。芸苔属饲用作物种类很多，在全世界各地均有栽培，主要有羽衣甘蓝（kale; *Brassica oleracea*）、芜菁（turnip，*B. campestris*）、饲用油菜（rape，*B. napus*）和蕉青甘蓝（swede，*B. napus* ssp. *rapifera*）[15]。我国芸苔属饲用作物主要有芜菁甘蓝（*B. napobrassica* Mill.）、甘蓝（*B. oleracea* L.）、小白菜[*B. campestris* L. ssp. *chinensis* Makino （var. *communis* Tsen et Lee）][16]、饲用油菜（*B. campestris*）、芜菁（*B. rapa*）[17]。目前我国主要大力推广饲用油菜[18]。

芸苔属饲用作物具有较强的抗寒性能，是中旱生植物，对土壤要求不十分严格，生长期短，可用作填闲种植[15]，在晚秋和早春能提供青绿饲料[17]。2016 年中华人民共和国农业

部印发的《全国种植业结构调整规划（2016–2020 年）》[19]中提倡在南方地区冬闲田中重点发展饲用油菜，在东北地区也可用于春小麦后的复种作物。西北地区作物生长“一季有余、二季不足”，适于麦、豆收获后种植，利用土地空闲期的水、热、光照资源，增加饲料供应[20-21]。

芸苔属饲用作物产量高，例如，饲用油菜平均每公顷鲜草产量达 47 t，在我国有广阔的推广前景[18]。芸苔属饲用作物属双子叶植物，植株木质化前营养丰富。饲用油菜含粗蛋白质 3%~14%、粗脂肪 1.6%~2.3%，粗灰分 6.4%~6.6%、中性洗涤纤维 54%~57%、酸性洗涤纤维 32%~35%[22]。芸苔属饲用作物在反刍动物上的饲用价值较高，消化率、代谢能高于多数牧草，家畜生产性能表现也较好。放牧条件下，绵羊采食芜菁和饲用油菜的日增重虽低于白三叶（*Trifolium repens*），但高于黑麦草[15]。

2.2 芸苔属饲用作物的甲烷减排效果

利用芸苔属饲用作物减少反刍动物甲烷减排方面的研究并不多。体外试验主要在澳大利亚、美国、新西兰进行，动物试验研究主要集中在新西兰，澳大利亚也进行了少量研究。

Durmic 等[23]用包括芸苔属饲用作物在内的 10 种牧草进行体外批次瘤胃发酵培养试验，发现箭叶三叶草（*T. vesiculosum*）甲烷产量最高，芜菁和饲用油菜杂交种（*B. napus* cv. Winfred）和芜菁的甲烷产量比箭叶三叶草低 30%，但同一牧草不同样品间甲烷产量相差很大。西兰花（*B. oleracea*）和饲用油菜和甘蓝杂交种（*B. campestris* × *B. napus*）的甲烷产量与箭叶三叶草没有显著差异。硫代葡萄糖苷（又称芥子油苷，GSL）含量高的西兰花品种与含量低的品种甲烷产量也没有显著差异。Dillard 等[24]利用连续培养发酵系统研究了芸苔属饲用作物营养物质消化率、短链脂肪酸和甲烷产量。培养底物的一半为鸭茅（*Dactylis glomerata*），另一半分别为饲用油菜、籽用油菜（*B. napus*）、芜菁、一年生黑麦草（*L. multiflorum*）。结果发现，总短链脂肪酸浓度、pH、乙酸占总短链脂肪酸摩尔比例，芸苔属饲用作物与一年生黑麦草无显著差异，但饲用油菜和籽用油菜的丙酸占总短链脂肪酸摩尔比例低于一年生黑麦草，而饲用油菜的丁酸占总短链脂肪酸摩尔比例高于一年生黑麦草。芸苔属饲用作物的甲烷产量低于一年生黑麦草，按每克有机物、中性洗涤纤维、可消化有机物、可消化中性洗涤纤维计，也是芸苔属饲用作物低于一年生黑麦草。Sun 等[25]把羽衣甘蓝、芜菁、饲用油菜、蕉青甘蓝（*B. napus* ssp. *rapifera*）和多年生黑麦草冻干后粉碎作为体外批次培养的底物，发现芸苔属饲用作物的乙酸/丙酸低于多年生黑麦草，但甲烷产量与多年生黑麦草没有显著差异，释放的氢（大量氢的释放和积累是甲烷菌受抑制的标志）也没有大幅增加。在体外瘤胃发酵培养中，不同试验出现不同结果，甚至同一试验中同一牧草

的不同样品结果也不一致，其原因尚不清楚。单从体外试验结果不能得出明确的结论。

动物试验研究方面，新西兰研究人员进行了 8 个试验的系列研究[14]。试验 1：在冬季进行，使用 4 种常见的芸苔属饲用作物羽衣甘蓝、芜菁、饲用油菜和蕉青甘蓝，分别作为唯一饲料饲喂舍饲绵羊，7 周后测定甲烷排放，与作为对照的多年生黑麦草相比，单位干物质采食量的甲烷排放量，即甲烷产量（g/kg DMI），分别减少 10%、6%、25%和 23%。芸苔属饲用作物的干物质、有机物质、粗蛋白质、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的表观消化率均比多年生黑麦草高，按单位可消化干物质产生的甲烷计，这 4 种芸苔属饲用作物比多年生黑麦草分别减少 27%、23%、39%和 43%的排放。之后，还进行了一系列动物试验，结果均表明芸苔属饲用作物有良好的减排作用[8]。试验 2：在冬季进行，以饲用油菜作为唯一饲料饲喂舍饲绵羊 7 周，甲烷产量减少 30%，延长饲喂到 15 周再测定甲烷，结果甲烷产量仍能减少 22%[26]。这一试验还测定了营养物质消化率、饲粮能量平衡、氮平衡、消化能、代谢能、瘤胃降解动力学参数、瘤胃发酵参数、瘤胃食糜流通速度等指标，结果显示饲用油菜比多年生黑麦草有更高的营养价值[26]，饲喂饲用油菜甲烷排放减少的同时生产性能可能更好。试验 3：在冬季，以绵羊为试验动物，同时在室内和放牧条件下进行，仍然以饲用油菜作为唯一饲料，与黑麦草相比，室内舍饲条件下，第 7 周甲烷产量减少 37%，第 12 周减少 31%；放牧条件下，第 7 周减少 32%，第 12 周减少 34%[27]。这一试验还测定了动物生产性能，在饲用油菜草地上放牧的绵羊日增重为 315~365 g，高于在黑麦草草地上放牧的绵羊（210~307 g）。放牧饲用油菜的绵羊屠宰率为 46.2%，也高于放牧黑麦草的绵羊（42.9%）。按每千克增重排放的甲烷计，饲用油菜为 41.9~48.2 g，而黑麦草为 62.5~123.8 g[27]。试验 4：在夏季进行，球根型芜菁、叶菜型芜菁、饲用萝卜（*Raphanus sativus*）、饲用油菜分别作为唯一饲料饲喂舍饲绵羊，4 周后与黑麦草/白三叶混合牧草（按鲜重计，黑麦草 92%，白三叶 6%，杂草 2%）相比，甲烷产量分别减少 20%、33%、22%、10%[28]。试验 5：在冬季进行，以饲用油菜作为唯一饲料饲喂舍饲绵羊，从第 33 天至第 66 天分 7 期测定甲烷，甲烷产量只有 11.5~14.2 g/kg DMI[29]。试验 6：在夏季进行，以新鲜叶菜型芜菁、头茬,饲用油菜、二茬饲用油菜、球根型芜菁分别作为唯一饲料饲喂舍饲绵羊，32 d 后测定甲烷排放，与黑麦草/白三叶混合牧草（按鲜重计，67%：33%）相比，叶菜型芜菁、头茬饲用油菜、二茬饲用油菜甲烷产量分别减少 15%、16%、13%，但球根型芜菁增加排放 13%[25]。试验 7：在冬季进行，以新鲜饲用油菜和多年生黑麦草配制 5 种混合饲粮饲喂舍饲绵羊，前 4 种饲料中，饲用油菜分别占饲粮干物质的 100%、75%、50%、25%，饲喂 24 d 后，与纯黑麦草饲粮相比，甲烷产量减少 64%、43%、27%、9%，呈线性下降[30]。这一试验还测定了营养物质消化率、能量平衡、氮平衡、瘤胃发酵参数等指标，饲用油菜占饲粮干物质的 50%时氮

沉积最多。试验 8：在冬季进行，以新鲜饲用油菜作为唯一饲料饲喂小母牛 32 d 以上，结果发现与含黑麦草 96%、白三叶 3%、杂草 1%的混合牧草相比，饲用油菜甲烷产量减少 43%[31]。

Williams 等[32]在夏季进行了芸苔属饲用作物（*B. napus* cv. *Winfred*）饲喂奶牛的试验。试验动物为产犊后 5 个月的泌乳期舍饲奶牛，对照饲粮由生殖生长期的新鲜菊苣、苜蓿草块和压碎玉米组成，按干物质计，饲粮含菊苣 41%、苜蓿 34%、玉米 25%，试验饲粮由新鲜芸苔属饲用作物取代等量干物质的菊苣，饲粮其他组分不变。连续饲喂 10 d 并在第 6~10 天测定甲烷排放，发现饲喂芸苔属饲用作物的奶牛比饲喂菊苣的奶牛单位干物质采食量排放的甲烷少 21%，单位产奶量排放的甲烷少 27%。

可见，芸苔属饲用作物在不同季节、舍饲或放牧、混合或单独饲喂情况下，除个别情况外，反刍动物均可不同程度地减少甲烷排放，而且连续饲喂 15 周时减排效果不消失。

3 芸苔属饲用作物减少反刍动物甲烷排放的可能机理

3.1 饲料化学成分

一系列试验[8，33-37]的甲烷产量和饲料化学成分，如灰分、粗蛋白质、粗脂肪、可溶性碳水化合物、果胶、淀粉、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、木质素、易发酵碳水化合物与结构性碳水化合物的比值、硝酸盐、硫酸盐等进行相关分析，发现仅粗蛋白质（n=287，r=–0.584，P<0.001）和硝酸盐（n=210, r=–0.530，P<0.001）有中等程度的负相关。芸苔属饲用作物硝酸盐含量为 7.1~750 mmol/kg DM（或 0.1~10.5 g/kg DM）[15]，变化范围很大。按照 1 摩尔硝酸盐理论上最多可减少 1 摩尔甲烷排放[38]计算，在 Sun 等[14]的试验中，与作为对照的多年生黑麦草相比，硝酸盐最多可减少甲烷排放 0.1~0.6 g/kg DMI。在有些情况下，芸苔属饲用作物硝酸盐含量远低于多年生黑麦草，甚至低于可测定的下限[14]。因此，硝酸盐虽然对芸苔属饲用作物甲烷排放量少有贡献，但不是根本的原因。粗蛋白质和硝酸盐高度正相关（n=50，r=0.584，P<0.001），可能也因此与甲烷产量负相关。将甲烷产量与饲料化学成分进行多元回归分析，整个模型调整后的 R^2 为 0.450（DF=134，P<0.001），其中酸性洗涤纤维是正变量，水溶性碳水化合物是负变量。这说明饲料化学成分仅能部分解释芸苔属饲用作物甲烷产量的变异，结构性和水溶性碳水化合物起一定作用。

3.2 瘤胃发酵参数

将 8 个系列试验[8，33-37]中 218 只饲喂油菜绵羊的瘤胃发酵数据与甲烷产量数据进行相关分析，表明甲烷产量与采食前乙酸/丙酸（r=0.393）、（乙酸+丁酸)/丙酸（r=0.411）、乙酸（r=0.420）、丙酸（r=0.350）、戊酸（r=0.473）浓度以及与采食后丁酸（r=0.295）和丙酸（r=0.322）浓度有一定程度的相关。多元回归分析结果表明，采食前样品中仅挥发性脂肪

酸浓度、乙酸/丙酸、(乙酸+丁酸)/丙酸达显著水平，整个模型调整后的 R^2 为 0.417（$DF=202$，$P<0.001$）。采食后样品中，整个模型调整后的 R^2 为 0.418（$DF=133$，$P<0.001$），仅乙酸浓度达显著水平（$P=0.042$）。这些结果表明芸苔属饲用作物甲烷排放与瘤胃发酵类型有部分相关性。

多元回归分析表明氨与甲烷排放无关，氨不参与甲烷形成的代谢过程。

绵羊饲喂饲用油菜时，在 24 h 内所有采样时间点，瘤胃 pH 比饲喂多年生黑麦草的低，饲用油菜平均 6.02，而黑麦草平均 6.71[26]。一般认为瘤胃 pH 可以影响甲烷排放。但用碳酸钠调节瘤胃 pH 的试验并没有证明饲用油菜甲烷排放量低是源于瘤胃 pH[29]。

3.3 芸苔属饲用作物对瘤胃微生物的影响

饲喂饲用油菜的绵羊其瘤胃各类细菌、甲烷菌及原虫的相对丰度与饲喂多年生黑麦草的绵羊相差很大[26]。饲喂饲用油菜的绵羊瘤胃内产氢细菌，如瘤胃球菌属（*Ruminococcus*）、未归类的（unclassified）瘤胃球菌科（Ruminococcaceae）及梭菌目（Clostridiales）的细菌，数量较少，说明生成的氢较少。生成的氢少，加之较多的丙酸，可能导致甲烷形成较少[10]。

饲喂饲用油菜的绵羊瘤胃中，甲醇产甲烷菌比饲喂多年生黑麦草的绵羊丰富[26]。甲醇产甲烷菌利用氢和甲醇生成甲烷。饲用油菜含有较多的果胶[14,26]。果胶上的甲基可生成甲醇，再作为甲醇产甲烷菌的底物，最终生成甲烷[33]。这应会导致甲烷排放量增加，而非减少，因此果胶和甲醇产甲烷菌不可能是饲用油菜甲烷排放量少的原因。

饲喂饲用油菜的绵羊瘤胃原虫数量变化不大，只有瘤胃纤毛虫（Eudiplodinium）稍有变化[26]，原虫应可排除。

3.4 甲烷菌抑制物质

虽然在瘤胃体外试验中甲烷产量的试验结果不一致[23-25]，但值得注意的是体外培养过程中没有释放大量的氢[25]，表明甲烷菌没有受到抑制，芸苔属饲用作物不含有直接抑制甲烷菌的物质或其作用可以忽略不计。GSL 含量高的品种和低的品种甲烷产量没有差异[23]，表明 GSL 没有起到甲烷抑制剂的作用。

3.5 芸苔属饲用作物中 GSL 和甲硫半胱氨酸亚砜（SMCO）可能的减排作用

3.5.1 GSL 和 SMCO

GSL 和 SMCO 是两类植物次生代谢产物，广泛存在于芸苔属植物中，属于抗营养因子[15]。芸苔属饲用作物都含有 GSL 和 SMCO，而在多年生黑麦草中几乎不含。

GSL 是一类含硫的阴离子亲水性植物次生代谢产物，其核心结构是β-*D*-葡萄糖连接一个磺酸盐醛肟基团和一个来源于氨基酸的侧链[34]。Sun 等[14]发现 4 种芸苔属饲用作物甘蓝、芜菁、饲用油菜和蕉青甘蓝中共含有 18 种 GSL，每种植物含 9~16 种，其中 3~4 种占总含

量的 80%以上，并且每种植物含有的主要 GSL 都不一样，但 4-戊烯基硫代葡萄糖苷含量普遍较多，饲用油菜、蕉青甘蓝、芜菁中均超过总含量的 40%，黑芥子苷在羽衣甘蓝中超过总含量的 30%。GSL 没有生理活性，需与β-硫代葡萄糖苷酶（又称黑芥子酶）结合，降解成多种生物活性物质。GSL 与β-硫代葡萄糖苷酶存在于不同的细胞或者同一细胞的不同区域。在植物受机械破坏时两者发生反应，反应生成的生物活性物质主要有硫代氰酸盐、异硫氰酸盐（ITC）、腈类、环硫腈和唑烷-2-硫酮，其中 ITC 是最主要的产物[35]。

3.5.2 GSL 和 SMCO 在反刍动物体内的降解与生理作用

在瘤胃中 GSL 主要生成 ITC 和腈类，在羽衣甘蓝叶中有 21%~41%、蕉青甘蓝叶中有 37%、蕉青甘蓝肥大直根中有 50%的 GSL 转变成腈类[15]。绵羊采食羽衣甘蓝后腈类至少 23 h 内不被分解，但采食蕉青甘蓝肥大直根和叶片后，腈类 4 h 内完全被降解。

GSL 对甲烷的影响有一些体外试验报道。Soliva 等[36]按 75 mg/L 添加异硫氰酸烯丙酯，发现乙酸比例减少、丁酸比例增加、甲烷形成减少、氢气积累。Lee 等[37]用含异硫氰酸烯丙酯的芥菜籽分别添加 3.33、5.00、6.67 和 8.33 g/L，进行体外培养，也发现类似结果。但他们使用的浓度远高于天然饲料中可能达到的浓度。GSL 对甲烷的影响未见动物试验报道。

SMCO 是一种非蛋白氨基酸，在芸苔属植物中按干重计含 1%~2%[39]。植物组织破碎时液泡中的半胱氨酸亚砜裂解酶释放，把 SMCO 分解成氨、丙酮酸盐和甲磺酸。SMCO 在瘤胃内完全转化为二甲亚砜[15]。二甲亚砜与蛋白质中巯基结合，使蛋白质失活，例如可使血红蛋白含量下降，甚至引起贫血，也能影响机体其他蛋白质和微生物蛋白质的生产。SMCO 能增加血浆中生长激素和甲状腺素水平，这样可以刺激机体蛋白质合成，用以取代被二甲亚砜失活的蛋白质。SMCO 对甲烷排放的影响尚未见报道。

3.5.3 GSL 和 SMCO 对反刍动物甲烷减排可能的作用

在上节提到的体外试验中，芸苔属饲用作物不能减少甲烷生成，说明正常浓度下 GSL 和 SMCO 对瘤胃内甲烷的形成没有直接抑制作用。

游离三碘甲状腺氨酸（FT_3）是甲状腺激素三碘甲状腺氨酸（T_3）有生理活性的形式。饲喂芸苔属饲用作物可以提高血清中 FT_3 的浓度[40]。给成年阉公绵羊每 2 d 注射 300 μg 激素 FT_3，使血液 FT_3 浓度增加，全消化道食糜平均停留时间（MRT）减 [41]。Pinares-Patino 等[42]用苜蓿饲喂绵羊，发现食糜在瘤胃停留时间（特别是固相停留时间）短的羊甲烷产量低。Goopy 等[43]双向选择甲烷产量高和低的成年母羊，发现甲烷产量低的羊，瘤胃体积小，液相和固相食糜停留时间短。通过注射 FT_3，人为提高血液 FT_3 浓度，可造成食糜停留时间缩短，甲烷产量下降 8%[41]。改变环境温度造成绵羊体内血液 FT_3 浓度提高，也可缩短食糜停留时间，降低甲烷产量[44]。

因此，笔者的假说是：芸苔属饲用作物 GSL 和/或 SMCO 及其代谢产物正常采食条件下其浓度对甲烷菌没有直接抑制作用，但提高了绵羊体内 FT_3 浓度，导致食糜停留时间减少，从而降低甲烷排放。

4 小　结

芸苔属饲用作物能大幅减少反刍动物甲烷排放。其减排效果，除个别情况外，在不同季节、舍饲或放牧、混合或单独饲喂情况下，均能不同程度地体现，而且连续饲喂时减排效果不消失。机理方面，目前的研究虽排除了一些可能的因素，但仍不明确。饲料常规成分不能解释甲烷排放量少的原因，也不存在甲烷菌抑制物质，硝酸盐可能是甲烷排放减少的部分原因。饲喂芸苔属饲用作物后瘤胃微生物区系发生改变，瘤胃发酵类型也相应改变，可能也只是部分原因。瘤胃 pH 降低，但没有低到足以抑制甲烷菌。次生代谢产物的作用尚不清楚，但根据文献推测，GSL 和 SMCO 及其代谢产物可能与甲烷排放减少有关。这些成分可能刺激 FT_3 的分泌，导致食糜停留时间减少，从而降低甲烷排放。这一假设尚需试验验证。

饲喂芸苔属饲用作物是一种简便可行、易于推广、低耗无污的减排措施。我国有许多芸苔属饲用作物，如饲用油菜、芜菁甘蓝、甘蓝、小白菜，特别是饲用油菜目前正得到大力推广。利用芸苔属饲用作物是我国减少反刍动物甲烷排放的一个重要途径。如 GSL 和 SMCO 及其代谢产物在甲烷减排中的作用得到证实，芸苔属作物副产品，如菜籽粕，也将有可能开发，用于减少甲烷排放。

致谢：

感谢中国农业大学动物科技学院赵广永教授对文稿所提的宝贵意见。

参考文献：

[1] AYDIN G,KARAKURT I,AYDINER K.Evaluation of geologic storage options of CO_2:applicability,cost,storage capacity and safety[J].Energy Policy,2010,38(9):5072–5080.

[2] REEBURGH W S.Global methane biogeochemistry[M]//KEELING R F.Treatise on Geochemistry.Oxford:Elsevier-Pergamon,2003:65–89.

[3] KIRSCHKE S,BOUSQUET P,CIAIS P,et al.Three decades of global methane sources and

sinks[J].Nature Geoscience,2013,6(10):813–823.

[4] NAYAK D,SAETNAN E,CHENG K,et al.Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture[J].Agriculture,Ecosystems & Environment,2015,209:108–124.

[5] ZHOU J B,JIANG M M,CHEN G Q.Estimation of methane and nitrous oxide emission from livestock and poultry in China during 1949–2003[J].Energy Policy,2007,35(7):3759–3767.

[6] IPCC.Greenhouse gas inventory reference manual:revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,Report vol.3[R].Paris:Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),1997.

[7] APPUHAMY J A D R N,FRANCE J,KEBREAB E.Models for predicting enteric methane emissions from dairy cows in North America,Europe,and Australia and New Zealand[J].Global Change Biology,2016,22(9):3039–3056.

[8] SUN X Z,PACHECO D,LUO D W.Forage brassica:a feed to mitigate enteric methane emissions?[J].Animal Production Science,2016,56(3):451–456.

[9] MURRAY R M,BRYANT A M,LENG R A.Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep[J].British Journal of Nutrition,1976,36(1):1–14.

[10] JANSSEN P H.Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics[J].Animal Feed Science and Technology,2010,160(1/2):1–22.

[11] PATRA A,PARK T,KIM M,et al.Rumen methanogens and mitigation of methane emission by anti-methanogenic compounds and substances[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2017,8(2):271–288.

[12] BROUCEK J.Options to methane production abatement in ruminants:a review[J].Journal of Animal and Plant Sciences,2018,28(2):348–364.

[13] HRISTOV A N,OH J,FIRKINS J L,et al.SPECIAL TOPICS-Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: Ⅰ .a review of enteric methane mitigation options[J].Journal of Animal Science,2013,91(11):5045–5069.

[14] SUN X Z,WAGHORN G C,HOSKIN S O,et al.Methane emissions from sheep fed fresh brassicas

(*Brassica* spp.) compared to perennial ryegrass (*Lolium perenne*)[J].Animal Feed Science and Technology,2012,176(1/2/3/4):107–116.

[15] BARRY T N.The feeding value of forage brassica plants for grazing ruminant livestock[J].Animal Feed Science and Technology,2013,181(1/2/3/4):15–25.

[16] 董宽虎,沈益新.饲草生产学[M].2 版.北京:中国农业出版社,2016.

[17] 洪锐民,李国臣,张国琪,等.芸苔属饲料作物的特点及栽培作用[J].饲料博览,1996(2):16－17.

[18] 王洪超,刘大森,刘春龙,等.饲料油菜及其饲用价值研究进展[J].土壤与作物,2016,5(1):60－64.

[19] 中华人民共和国农业部.农业部关于印发《全国种植业结构调整规划(2016－2020 年)》的通知[EB/OL].(2016-04-28). http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201604/t20160428_5110638.htm.

[20] 段震宇,祁亚琴,邵玉林,等.北疆麦后复播饲料油菜的播种量对其生长性状的影响[J].西南农业学报,2016,29(3):516－519.

[21] 俞晓红.宁夏引黄灌区麦后复种饲料油菜播种量和收获期的研究[D].硕士学位论文.银川:宁夏大学,2016:1–44.

[22] 文健,刘桂琼,姜勋平,等.饲用油菜生物量与营养成分测定及其发酵全混合日粮饲喂湖羊效果[J].华中农业大学学报,2018,37(2):71–75.

[23] DURMIC Z,MOATE P J,JACOBS J L,et al.*In vitro* fermentability and methane production of some alternative forages in Australia[J].Animal Production Science,2016,56(3):641–645.

[24] DILLARD S L,ROCA-FERNÁNDEZ A I,RUBANO M D,et al.Enteric methane production and ruminal fermentation of forage brassica diets fed in continuous culture[J].Journal of Animal Science,2018,96(4):1362–1374.

[25] SUN X Z,PACHECO D.Greenhouse gas emissions from lambs fed summer forage brassicas or pasture[R] Wellington,New Zealand:Ministry for Primary Industries,2014.

[26] SUN X,HENDERSON G,COX F,et al.Lambs fed fresh winter forage rape (*Brassica napus* L.) emit less methane than those fed perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.),and possible mechanisms behind the difference[J].PLoS ONE,2015,10(3):e0119697.

[27] SUN X Z,HOOGENDOORN C,LUO J,et al.Greenhouse gas emissions from lambs grazing either forage rape or perennial ryegrass[R]Wellington,New Zealand:Ministry for Primary Industries,2013.

[28] SUN X Z,MACLEAN S,LUO D W,et al.Sheep fed five different summer forage brassicas emitted less methane than sheep fed perennial ryegrass/white clover pasture[R]Australia：CSIRO,2014,30:98.

[29] SUN X Z,HARLAND R,PACHECO D.Effect of altering ruminal pH by dietary buffer supplementation on methane emissions from sheep fed forage rape[R].Wellington,New Zealand:A report to the Pastoral Greenhouse Gas Research Consortium (PGgRc),2015.

[30] SUN X Z,SANDOVAL E,PACHECO D. Brief communication: Substitution of perennial ryegrass with forage rape reduces methane emissions from sheep [J].Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production,2015,75:64–66.

[31] SUN X Z,HOOGENDOORN C,LUO J,et al.Greenhouse gas emissions from cattle fed winter forage rape or pasture[R]Wellington,New Zealand:Ministry for Primary Industries,2015.

[32] WILLIAMS S R O,MOATE P J,DEIGHTON M H,et al.Milk production and composition,and methane emissions from dairy cows fed lucerne hay with forage brassica or chicory[J].Animal Production Science,2016,56(3):304–311.

[33] POL A,DEMEYER D I.Fermentation of methanol in the sheep rumen[J].Applied and Environmental Microbiology,1988,54(3):832–834.

[34] FAHEY J W,ZALCMANN A T,TALALAY P.The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants[J].Phytochemistry,2001,56(1):5–51.

[35] 张凯鑫,赵海燕,李晶.芥子油苷-黑芥子酶防御系统的最新研究进展[J].植物生理学报,2017,53(12):2069－2077.

[36] SOLIVA C R,AMELCHANKA S L,DUVAL S M,et al.Ruminal methane inhibition potential of various pure compounds in comparison with garlic oil as determined with a rumen simulation technique (Rusitec)[J].British Journal of Nutrition,2011,106(1):114–122.

[37] LEE K Y,KIM K H,BAEK Y C,et al.Effects of mustard seeds and powder on *in vitro* ruminal fermentation characteristics and methane production[J].Journal of Animal Science and Technology,2013,55(1):25–32.

[38] VAN ZIJDERVELD S M,GERRITS W J J,APAJALAHTI J A,et al.Nitrate and sulfate:effective

alternative hydrogen sinks for mitigation of ruminal methane production in sheep[J].Journal of Dairy Science,2010,93(12):5856–5866.

[39] EDMANDS W M B,GOODERHAM N J,HOLMES E,et al.S-methyl-L-cysteine sulphoxide:the Cinderella phytochemical?[J].Toxicology Research,2013,2(1):11–22.

[40] COX-GANSER J M,JUNG G A,PUSHKIN R T,et al.Evaluation of Brassicas in grazing systems for sheep:II.blood composition and nutrient status[J].Journal of Animal Science,1994,72(7):1832–1841.

[41] BARNETT M C,GOOPY J P,MCFARLANE J R,et al.Triiodothyronine influences digesta kinetics and methane yield in sheep[J].Animal Production Science,2012,52(7):572–577.

[42] PINARES-PATINO C S,ULYATT M J,LASSEY K R,et al.Rumen function and digestion parameters associated with differences between sheep in methane emissions when fed chaffed lucerne hay[J].Journal of Agricultural Science,2003,140(2):205–214.

[43] GOOPY J P,DONALDSON A,HEGARTY R,et al.Low-methane yield sheep have smaller rumens and shorter rumen retention time[J].British Journal of Nutrition,2014,111(4):578–585.

[44] BARNETT M C,MCFARLANE J R,HEGARTY R S.Low ambient temperature elevates plasma triiodothyronine concentrations while reducing digesta mean retention time and methane yield in sheep[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2015,99(3):483–491.

Mitigation of Methane Emissions with Forage Brassicas in Ruminants and Possible Mechanisms

SUN Xuezhao

(*The Innovation Center of Ruminant Precision Nutrition and Smart Farming, College of Animal Science and Technology, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin* 132109*, China*)

Abstract: Methane is a greenhouse gas formed mainly from the microbial degradation of feeds in the ruminant digestive tract. Methane emissions from ruminants not only result in the loss of a large amount of feed energy but also contribute to the global warming. Forage brassicas are important temporary “fill-in” crops with high nutritive values. When fed to ruminants, methane emissions largely decrease. The mitigation effects can exist in different seasons under grazing or

housing conditions when fed alone or as a part of the diet. Thus, forage brassicas could be an approach to the mitigation of methane emissions with a great potential to use in practice. To find out the possible causes for the low emissions with forage brassicas, feed chemical composition, rumen fermentation parameters and ruminal microbes were explored, but the mechanisms are still not identified. This review summarized effects of forage brassicas on mitigation of methane emissions from ruminants and proposed possible mechanisms.

Key words: forage brassicas; methane emissions; mitigation; ruminant; effect; mechanism

---

Author, SUN Xuezhao, professor, E-mail: xuezhaos@hotmail.com

（责任编辑　陈　鑫）